

一种基于光学杠杆的新型精密角度传感器研究

付 华, 冷卫强

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要:在精密角度传感器中,灵敏度和噪声性能是影响传感器精度的主要因素。为了提高角度传感器的灵敏度和噪声性能水平,采用以光学杠杆为基础,与萨格纳克效应(Sagnac)干涉仪结合的方法来建立一种新型的精密角度传感器。Sagnac干涉仪的干涉图样在相消干涉时对2个相干光束的光路差很敏感,而光学杠杆又可将光路差放大,从而提高灵敏度。同时,Sagnac干涉仪的相消干涉能抑制某些噪声源,从而提高噪声性能。通过实验仿真,验证了这种方法构建的精密角度传感器具有较高的灵敏度和噪声性能水平。

关键词:光学杠杆;精度;角度传感器;噪声

中图分类号:O439;TB96

文献标识码:A

Study on a New Type of Precision Angle Sensor Based on Optical Lever

FU Hua, LENG Weiqiang

(Faculty of Electrical & Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract:In precision angle sensor, the sensitivity and noise performance are two factors influencing the sensor accuracy. In order to improve the sensitivity and noise performance of the angle sensor, a new type of precision angle sensor has been built by combining the optical lever with Sagnac interferometer. The interference pattern of the Sagnac interferometer are very sensitive to the path difference of two coherent beam in the destructive interference, at the same time, the optical lever can amplify the beam path difference thus the sensitivity can be improved. Furthermore, the destructive interference of the Sagnac interferometer can suppress some noise source and then the noise performance can be improved. The simulation results show that the proposed precision angle sensor based on the optical lever has high sensitivity and high noise performance.

Key words:optical lever; accuracy; angle sensor; noise

0 引言

目前,精密测量技术越来越体现了各国高新技术的发展水平,角度测量是精密测量技术的重要组成部分,广泛用于航空、航海、工业、军事及通讯等各种领域。高分辨率、高精度的微小角度测量方法的研究成为该领域研究的重要内容。光学杠杆对于角度的测量可达到很高的精度,所能达到的最小角度噪声密度为 $10 \times 10^{-12} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。单回路 Sagnac 干涉仪运用到角度传感器中也具有较高的精度性能,而将其与光学杠杆合并,则形成了一种新型的精密角度传感器。本文将对该合并的角度传感器的敏感度和噪声性能水平进行研究。

1 光学杠杆和 Sagnac 干涉仪

光学杠杆是利用光线的反射使微量位移放大的

光学装置,适于精密测量的传感器^[1-2]。图1为光学杠杆原理图。由图可知,利用光学杠杆及多次反射可达到增强角敏感性的测量目的,即一个激光光束从一面镜子反射 N 次,当镜子偏转一个 $\delta\theta$ 的角度后,激光光束偏移 $2N\delta\theta$,从而导致了角测量敏感度的放大。

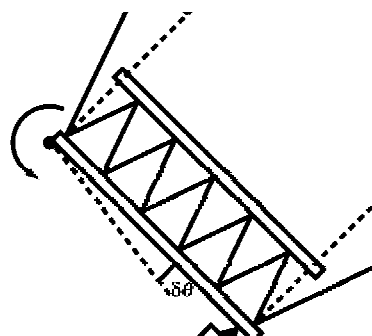


图1 光学杠杆原理图

收稿日期:2012-03-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70971059);辽宁省科技攻关基金资助项目(2011229011)

作者简介:付华(1962-),女,辽宁阜新,教授,博士生导师,博士(后),主要从事煤矿瓦斯监测,智能检测和数据融合技术方面的研究。

Sagnac 干涉仪原理如图 2 所示。激光经分束器分成反射和透射两束相干光,两束光间光程差的任何变化会很灵敏地导致干涉条纹的移动。当干涉条纹与完全相消干涉图样接近一致时,Sagnac 干涉仪的空间干涉图样对于角偏移变得敏感^[3]。同光学杠杆相比,Sagnac 干涉仪的相消干涉的增强可抑制某些噪声源。同样,不同于光学杠杆的偏转测量,Sagnac 干涉仪几何的本质是对输入角度的波动不敏感,从而提高了传感器的抗噪声性能。

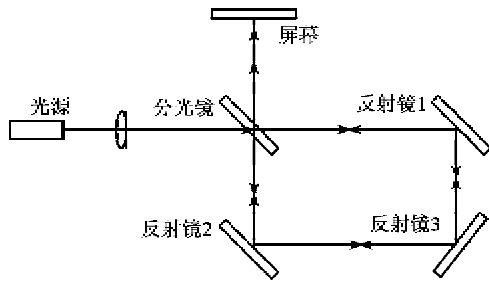


图 2 Sagnac 干涉原理图

2 传感器模型建立及其噪声分析

2.1 传感器模型建立

传感器模型的建立如图 3 所示。Sagnac 干涉仪是用一个非偏振立方射束分离器(NBS)将入射光分离为反射和透射两束相干光。其中反射光路逆时针,透射光路顺时针。实验的光来自于一个 850 nm 分布式布喇格反射激光器(DBR)。激光经过一个针孔空间滤波器(SF)和一个偏光器产生一个水平极化的高斯光束。光束的尺寸和差异可由一系列柔性焦距透镜组(L_1, L_2, L_3)来调整,其焦距分别为 $f_1 = 75 \text{ mm}$, $f_2 = 200 \text{ mm}$, $f_3 = 300 \text{ mm}$ 。在 L_3 的光束直径为 $\sigma_3 = 800 \text{ }\mu\text{m}$ 。通过探测器调整 L_3 光束准直,可使光束径向直径 σ 从 $600 \sim 2\,000 \text{ }\mu\text{m}$ 变化。Sagnac 干涉图样由一个光电探测器(PD)监测。同时用一个偏振立方射束分离器(PBS)将少量的光直接射到一个电荷耦合元件(CCD)图像传感器上以确保顺时针和逆时针两束相干光有好的模式重叠。用改进的光学杠杆来替换 Sagnac 干涉仪中的一个反射镜。改进的光学杠杆由 2 个平行的平面镜对齐形成,其中一个平面镜上安装压电换能器(PZT),这样可由一个控制量来调整它的角度。顺时针光束和逆时针光束间的相对相位 ϕ 可利用光的偏振来调整^[4],即在 Sagnac 干涉仪中插入 2 个 $1/4$ 波片和 1 个半波片。2 个 $1/4$ 波片的快轴方向分别被调整到

相对水平面 45° 和 135° ,这样使水平偏振的入射光从任何一个方向通过这 3 个偏振片后被旋转到垂直偏振;半波片可调整出理想的相对相位 $\phi = 4\beta$,其中 β 是该半波片的快轴和水平面之间的夹角。之后插入一个半波偏振片作为补偿器。

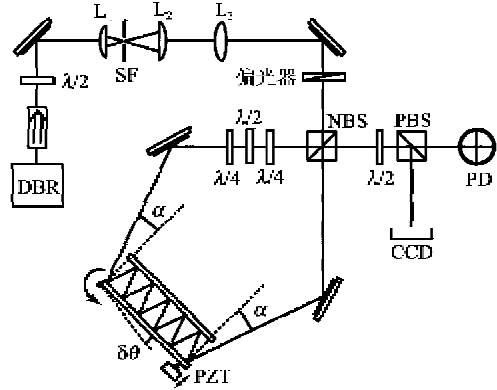


图 3 传感器模型

2.2 噪声分析

某一时刻,用探测器测量顺时针和逆时针光束的功率分别为 P_1 和 P_2 。两信号的功率差为

$$\Delta P = (P_1 - P_2) \propto k\sigma^2 \delta\theta \sin \phi \quad (1)$$

总功率为

$$P_{\Sigma} = (P_1 + P_2) \propto \sigma^2 \sin^2(\phi/2) \quad (2)$$

所以由 $\Delta P/P_{\Sigma}$ 推出,偏移的角度 $\delta\theta$ 的归一化的一阶响应为

$$S = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} k\sigma \delta\theta \cot(\phi/2) \quad (3)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为光的波矢; σ 由探测器测量光束腰斑得出。

由式(3)可看出,当 $\phi \rightarrow 0$ 时,与顺、逆时针光束间相消干涉一致。此时,对角偏移最敏感。

为了衡量噪声性能,由功率差和总功率得到^[5]

$$\delta(\Delta P) \propto (P_{\Sigma})^n \quad (4)$$

从而可推出信噪比

$$\text{SNR} = \frac{\Delta P}{\delta(\Delta P)} \propto \sin \phi \sin^{-2n}(\phi/2) \quad (5)$$

由式(5)可看出,对于某些技术噪声源($n=0$) (如杂散光、电子噪声等),在 $\phi = \pi/2$ 处有最佳信噪比;对于光子散射噪声($n=1/2$), $\phi \rightarrow 0$ 时有最佳信噪比;对于其他噪声源($n>1/2$,包括经典强度噪声 $n=1$),在 $\phi \rightarrow 0$ 时信噪比发散。

由此可知,最佳的 Sagnac 相对相位 ϕ 取决于仪器的噪声特性。顺、逆时针光束的干涉模式的变化反映了角偏移量 $\delta\theta$ 的变化,而干涉模式取决于顺、逆时针光束的相对相位 ϕ 。因此,相对相位 ϕ 是影

响着传感器分辨率主要因素。

3 实验仿真

为使在杠杆驱动镜前面的边缘光束无损耗,实验选择杠杆的入射角 $\alpha \approx 12.5^\circ$,此时 N 达到最大 11 次,镜子长 10 cm,镜子间距 $d \approx 2$ cm。

通过 CCD 图像传感器调整顺、逆时针两个相干光束有好的模式重叠,即相消干涉状态。PZT 给出一个已知振幅的频率为 2.4 kHz 的角度激励信号。调整 ϕ 从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化,同时,探测器以频带功率的均方根值法来提取信号的本底噪声^[6],其结果如图 4 所示。根据实验结果可知,当 $\phi = 84.6^\circ$ 时,传感器获得最佳的角分辨率为 $(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-12}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$,此时, SNR 亦达到最大。当 ϕ 接近 $\pi/2$ 时, SNR 最大,由此可看出测量的噪声主要由技术噪声主导。

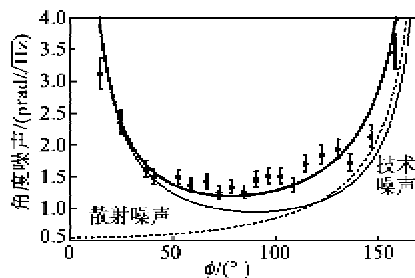


图 4 角度噪声曲线

调整传感器至最佳分辨率状况,即 $\phi = 84.6^\circ$ 时,为了对噪声性能进行比较,实验采用 Agilent 35670A 频谱分析仪分别测量了传感器在移除 Sagnac 干涉仪(移除 NBS 即可)和未移除时的角度噪声振幅谱线密度,其结果如图 5 所示,分辨带宽为 4 Hz。在 2.42 Hz 的尖峰是来自 PZT 本身的干扰。

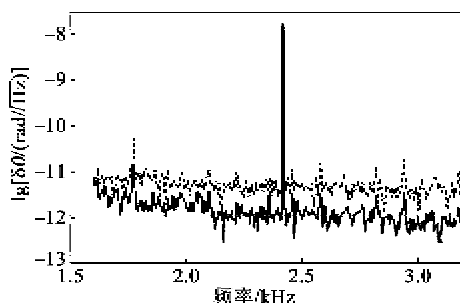


图 5 噪声性能比较

4 结束语

采用基于光学杠杆与 Sagnac 干涉仪合并的方法构建了一种新型的精密角度传感器。建立了该传感器的模型,并分析了该传感器的噪声性能。光学杠杆所能达到的最小角度噪声密度为 10×10^{-12} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。通过实验仿真获得了该传感器的最佳分辨率,其角度噪声密度能达到 $(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-12}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$,与光学杠杆相比,其精度更高,且将该传感器与光学杠杆的噪声性能进行比较可知,合并后的传感器达到了前所未有的灵敏度和噪声性能水平;但传感器仍存在一些噪声问题,如灵敏度仍被镜子基底的热扰动所限制等。

参考文献:

- [1] 高波. 基于光学杠杆的姿态角测试系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [2] 王巍,王晓磊,代作海,等. 掺 Fe^{3+} TiO_2 薄膜型氧气传感器研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2011, 23(4):443-446.
- [3] 周志良,付强,相里斌. Sagnac 干涉仪的几何参量计算[J]. 光子学报,2009,38(3):688-693.
ZHOU Zhiliang, FU Qiang, XIANG Libin. Calculation of geometric parameters of Sagnac interferometers[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3):688-693.
- [4] 黄金堂. 基于激光干涉技术的微纳结构制造研究[D]. 北京:中国科学技术大学,2011.
- [5] 王小林,周朴,赵海川,等. 基于波前补偿的高阶高斯光束相干合成[J]. 中国激光,2010,37(12):3025-3030.
WANG Xiaolin, ZHOU Pu, ZHAO Haichuan, et al. Coherent combining of high-order mode lasers with wave front compensation[J]. China Laser, 2010, 37(12):3025-3030.
- [6] MATNEEV A N, SOKOLOV A V, AKIMOV A V, et al. The effect of phase noise of bichromatic radiation upon resonances of coherent population trapping[J]. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2008, 35(5): 148-155.